本格的オーディオ・システム構築へ向けて

(30) 整流回路の設計法②

石塚 峻

電源トランスから引き出せる電力

長年アンプを作っている人にいきなりトランスの容量の何割を使うか訊ねると，30年選手なら「値段の高いものなら，ブリッジで6割，両波で5割」と，妥当な答えが返ってくるでしょう．

では，“安い”とはどういうことか，といいますと，秋葉原の電気街で堂々と売られているが，名のあるメーカーのカタログに載せられたオーディオ用トランスよりずっと安価，という意味です．こうしたものは，ブリッジ整流，コンデンサ・インプットで使うと，交流定格電流の半分でも明らかに発熱します(**第1図**)．

トランスの容量は，力率=1とされる抵抗負荷時の2次電圧Vと2次電流Aを掛算したVAで表示されます．Vは，相応の抵抗をつないで定格電流Iを流した際の2次電圧の実効値で，無負荷のときには，負荷時の電圧低下を見越して巻き足されたぶんだけ電圧は上昇します．そして，無負荷時電圧と定格負荷時電圧の比が変動率になります．

1980年代のトランスの変動率はだいたい**第1表**のとおりで，1次2次の電圧比より電圧変動率のぶんだけ多く巻き足されているのです．現在でも同様でしょう．2次25Vだから1次巻線100Vの4分の1に2次側を巻けばいい，というわけではありません．

では，整流平滑を行った場合のトランスの容量はどうやって決められているのでしょうか．実は，私も“ブリッジで6掛け”とその昔聞いていた口です．正しい計算法を知っているわけではありません．

本誌を見ても，トランスの容量について触れた記事は私の知る限り1つだけ，1993年4～7月号の鈴木道夫氏――当時は平田電機の設計者，のちISO代表――による『トランスの基本動作と材料』だけです．

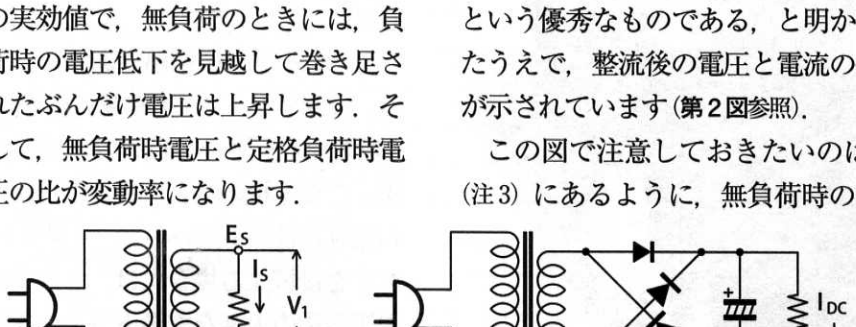
記事中，価格が高い方に属している「タンゴ」トランスは5%の巻き足しをしている，つまり変動率が5%という優秀なものである，と明かしたうえで，整流後の電圧と電流の値が示されています(**第2図参照**)．

この図で注意しておきたいのは，(注3) にあるように，無負荷時の直流電圧 E_{DC} を $1.4E_{AC}$ としている点です．また E_{AC} も，E_S という2次定格電圧ではなく，無負荷時には定格抵抗負荷時に比べて巻き足した分だけアップしている，いわば“下駄を履いた”値だということです．

ここでブリッジ整流時の電力を計算してみます．まずダイオードによるレベル・シフトを除外して定格負荷時の電力を求めるために E_{AC} を1.05で割っておくと，整流出力は $0.635E_S \times I_{AC}$ となり，経験値より良好なくらいです．いわゆる両波整流は2巻線に同量の電流を交互に流していて，E_{AC} が2倍になっていますから，このときは $0.571\overline{E_S} \times I_{AC}$ になります．ブリッジ整流は両波整流に比べてトランスの利用率が大きいとされていますが，計算すると11.2%になりました．一方，半波整流の場合は $0.435\overline{E_S} \times I_{AC}$ となり，

容量 VA	概略寸法 W×D×H(㎜)	変動率 (%)
10	50×45×60	35
15	60×45×70	25
30	70×55×90	17
50	85×65×120	15
70	85×70×120	12
100	85×80×120	9.5
200	110×100×140	7
300	135×110×150	6
500	150×135×150	3.8
1K	170×150×100	2.5

〈第1表〉トランスの容量，寸法と変動率
(「トランジスタ技術」1987年3月号　戸川／電源回路実用設計マニュアルより)



〈第1図〉その状態でも安いヒータ・トランスはかなり発熱する

両波整流の76.2%です.

これらの数値は，タンゴあるいはタンゴと同格の高価な部類のオーディオ用電源トランスならばほぼ同様と考えてもいいでしょうが，安価なヒータ・トランスの類では，手を触れられないくらいに発熱することがほとんどです.

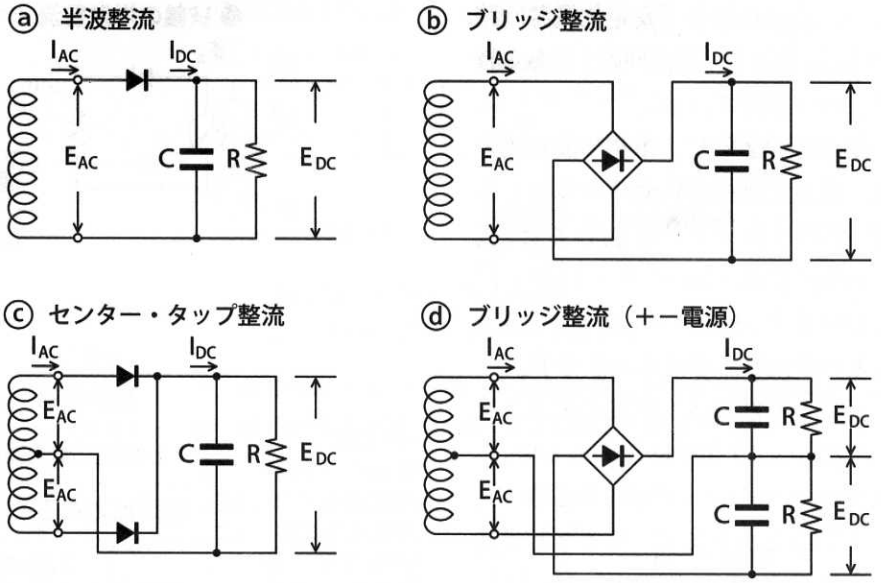
ちょうど2014年9月号の『クロストーク』に「半波整流をしたトランスが唸りを上げた」という投稿があり，このトランスは，ステップアップ用の100V：200Vの50VAのものとのこと．すると，2次電流の実効値は250mAとなります．これならタンゴなどの高価な部類のトランスならば十分なはずですが，ステップアップ用トランスは整流を前提にしていない，と聞いたことがありますから，この場合は，ブリッジ型の全波整流にした方が安全です.

力率との関係

私が見よう見真似でアンプというものをこしらえていた1960年代初頭では，極めて小型に属するオーディオ用電源トランスの力率は0.9くらいでした.「小型だから仕方がないが，話にならないくらい悪い」といわれていました.

何のことか当時はまったくわかりませんでした．位相角θのsinが力率といわれても，小学生では三角関数など習っていません．0.9は9割と思い，そこそこいいのではないかと思っていたのですが，実は$\cos\theta$の方が問題で，これは仕事をしないで出たり入ったりしている“無効率というべき迷惑なもの”の率だというのです.

このθについては，上記の鈴木論文の中でわかりやすく説明されていますので，参考にしてください（第3図）.

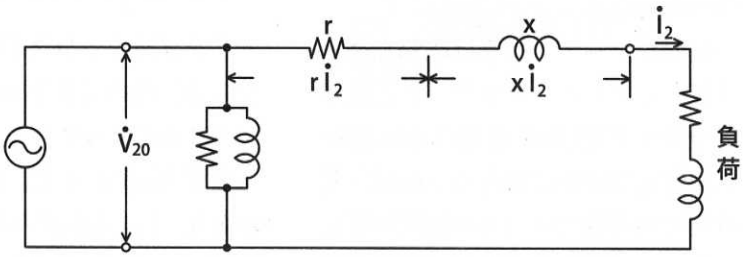


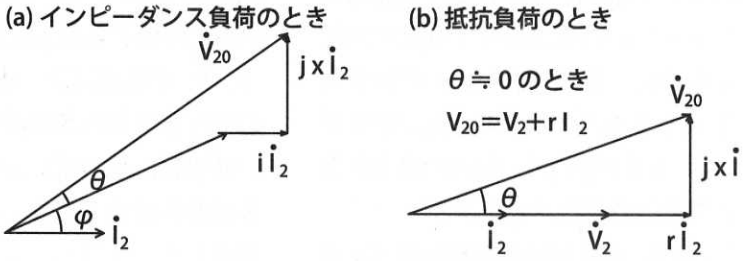
整流方式	整流後の電圧・電流	
	直流電圧E_{DC}	直流電流I_{DC}
ⓐ 半波整流	$1.05E_{AC}-E_d$	$I_{AC}/2.3$
センター・タップ整流	$1.2E_{AC}-E_d$	I_{AC}
ブリッジ整流 ⓑ	$1.12E_{AC}-2E_d$	$I_{AC}/1.8$
ブリッジ整流 ⓓ	$1.2E_{AC}-E_d$	

(1) E_d：整流素子の電圧降下　(2) R・C≒100kΩ・μF　(3)無負荷時の$E_{DC}\fallingdotseq1.4E_{AC}$

〈第2図〉「タンゴ」トランスの整流方式と整流後の電圧・電流

〈第3図〉整流出力の電圧・電流のベクトル図





●第2，3図とも本誌1993年6月号「鈴木道夫／トランスの基本動作と材料」より

そうなると，話が違ってきます.

$\cos\theta=\sqrt{1-(力率)^2}$

となりますから，力率0.9では無効率が43.6%にもなります．有効率では56.4%．これだけの無効電流がトランスの1次側と電灯線の間をただ単に出入りしているわけです.

では，力率から無効率を算出し，無効率を除外した値が整流して使える電力になるのでしょうか.

12月号**第3図**は私の説明不足なので，改めて説明しなおします．まず失礼なことに，出典が抜けていま

● 計算に必要な数値 = E_{DC}/E_m , $R_S/R_L = \overline{R_S}/R_L$

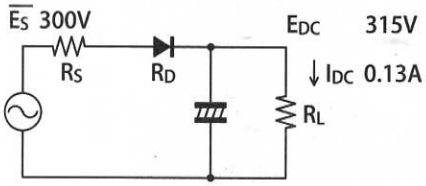
$\overline{E_S} = E_{AC} = 300V$, $I_{AC} = 0.3A$ として

$E_{DC} = 1.05E_{AC}$ ……①　　E_m (ピーク値) $= \sqrt{2}E_{AC}$

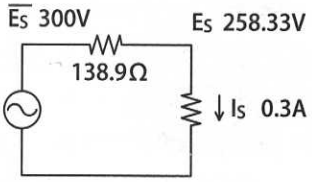
$I_{DC} = I_{AC}/2.3 = 0.13(A)$ ……②

$E_{DC}/E_m = 0.7424$ より $R_S/R_L = \overline{R_S}/R_L = 0.0575$ ……③

(1) 半波整流のとき ($R_D = 0$)

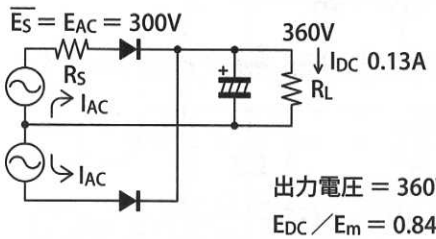


①②より
$R_L = 2415.6\Omega$



③より $R_S = 138.9\Omega$
● 変動率 = 13.9%
$E_S = 258.33V$
● 容量 = 77.5VA
整流出力電力
$= 315V \times 0.13A = 41.07W$
● 利用率 = 53.0%

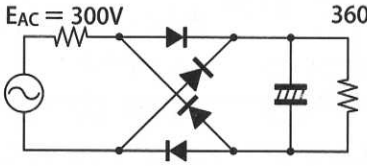
(2) 両波整流のとき



$E_{AC} = \overline{E_S} = 300V$
$I_{AC} = I_{DC} = 0.3A$
$E_{DC} = 1.2E_{AC}$
$= 360V$
$R_L = 1200\Omega$
出力電圧 $= 360V \times 0.3A = 108W$
$E_{DC}/E_m = 0.8485$
$\therefore R_S/R_L = 0.048$　$R_S = 57.6\Omega$
$E_S = 300 - (57.6 \times 0.3) = 282.72V$

● 変動率 : 6.1%　● トランス容量 : 169.68VA(両巻線に0.3A)
● 利用率 : 108/169.63 = 0.63667 = 63.67%

(3) ブリッジ整流のとき



$E_{AC} = 300V$
$I_{AC} = 0.3A$
$E_{DC} = 360V$
$I_{AC} = 0.3/1.8 = 0.1667A$
出力電力 = 60W

$E_{DC}/E_m = 300 \times 1.2/300 \cdot \sqrt{2} = 0.8485$
$R_S/R_L = 0.048$　$R_S = 103.68\Omega$
} 両波と同じ

● 変動率 : 10.368%　● 容量 : 80.69VA
● 利用率 : 60/80.6688 = 0.74378 = 74.37%

▲〈第5図〉▶
シャーデの図表を使って計算した「タンゴ」トランスによる整流回路の特性

考えるべきです．といっても，1960年代初頭の電源トランスと比べると，これでも妥当な進化に見えます．

2011年に50個限定で本誌が頒布したP60-185Gは5VAという小さな容量でしたが，力率は0.998という信じられないくらい良好で，少々無理に出力を取り出しても，さほど熱くなりませんでした．秋葉原電気街で同じ定格でもっとも大きかったトランスは，VA値では大きかったものの，夏場は素手ではさわれなくなりました．

このP60-185Gは$\theta = 3.624$しかなく，無効率でいうと6.321%と，桁が違うくらいに小さいものです．

さらに，近ごろ土岐啓太氏が試作を染谷電子に依頼した出力段用のより大型の電源トランスは，0.9996というあり得ないくらいの力率だそうです．$\theta = 1.6206°$，無効率では2.828%という値は，変電所で使うような巨大トランスで初めて得られるものなのです．巨大という意味は，“10kVAですら小型”というレベルでの話です．となると，この土岐トランスは97.17%の利用率となってしまいます．

いくら何でもこれは信じられない結果なので，あとから土岐氏に尋ねたところ，「テストなどで大出力をいくら出し続けてもトランスは冷たいままだった」とのことでした．

ちなみにJISでは，小型トランスは定格時に外気温+55°Cでいいことになっています．しかし，これでは気温25°Cでは80°Cまで発熱していいことになります．

P60-184Gは5VAで，しかも磁束密度を大幅に下げるために巻線数を倍にしているにもかかわらず，変動率は10.58%しかありません．それでも97%の利用率だったのは，別の要素で低下したとも考えられます．

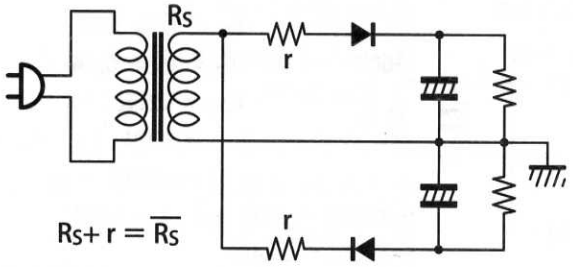
とにかく一般的なヒータ・トランスを使うことを前提にすれば，取り出せる直流電力は定格表示の半分，あるいは，それ以下と思った方がよいでしょう．

トランスの力率がよくないと，整流電源は騒々しくなります．無効電流が出入りしているということは騒音電流が存在しているということですから．

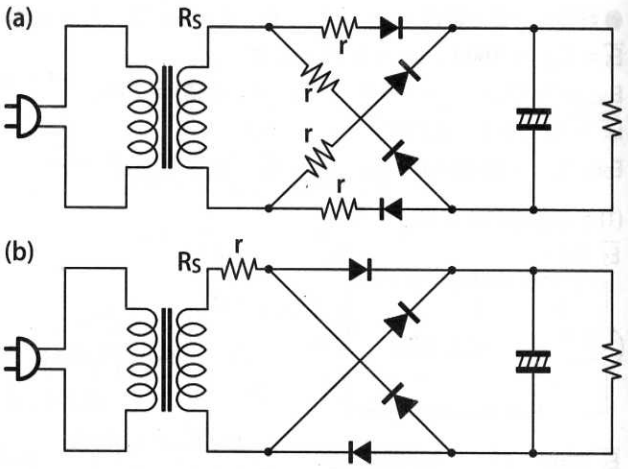
ヒータ用整流電源での留意点

EL-34を交流点火できる6.3V/2Aの巻線を整流して定電流回路用の電源とするのは，お勧めできないことになりました．外部にヒータ点火用のトランスを追加すべきでしょう．交流点火する場合でも，B電源付属の巻線は止め，外部トランスを追加した方が音は明快になります．しかも，定電流点火の場合に回路のR_Lは一定ですから，R_Sを追加しても，整流出力電圧は安定になります．

定電流回路が整流電源の負荷になった場合はR_Lは一定，といいましたが，シャーデの図表自体は「負荷が一定電流ならば電圧が定まる」としかいっていません．この図表で使われているR_Lとは負荷インピーダ



▲〈第6図〉
この回路では1.7%の電流が変化すると出力電圧も1.3%変動する



〈第7図〉▶
正電源だけならブリッジでも使える．(b) ではダイオードの V_F を揃えなくてはならない

ンスではなく，純抵抗または定電流回路を入れた場合の話です．これで平滑コンデンサの端子電圧が決まるとなると，何かおかしいのです．

実は，一般的に公表されているVA（=定格2次電圧×2次電流）の値からは，シャーデの図表があっても，端子電圧は計算できません．R_S，すなわちトランスの無負荷時と定格出力時の電位差を定格電流で割った値がぜひとも必要なのです．となると，整流出力電流ごとに個別の計算が必要です．入力と出力は明らかに非線形だからです．

あとから考えてわかったことですが，平滑コンデンサに突入する電流パルス――これだけで非線形成分が2つですが――，さらに負荷インピーダンスが変動するとなれば，見事にカオス現象となってしまいます．

おまけに，定格出力に比べて出力を減らした場合には，電流の位相ズレを示す力率――これも非線形の資格十分です――は低下します．つまり，余裕を持たせすぎたトランスはかえって力率を下げることすらあるのです．

結局，電流パルスを抑えているのは平滑コンデンサの等価抵抗とサプライ・インピーダンスです．Cを減らせないとなれば，$\overline{R_S}$ を足すことになります．もしトランスが持っているサプライ・インピーダンスだけで納まりがつくならば，発熱する外部抵抗や，寿命が短く平滑コンデンサの容量も大きくできずヒータが大飯食らいという整流管に頼らなくてもいいのです．

P60-185Gがそうなっていましたし，それに準じた土岐氏の特注トランスも重負荷にはまったく平気のようですが，では，逆に無負荷の場合にはどうでしょうか．

土岐アンプでは，パラ出力のカレント・ミラーで16mA，あれこれ入れても30mA前後しか流れていませんが，これは「アイドリングはぜひとも減らせ．ほんとうはB級がいい」と私がけしかけたことも一因でしょうが，この点については別府俊幸氏も同意見のようです．

土岐氏には「できれば100mAくらいのブリーダ電流を流すべきだ」と無責任なおすすめをしたところ，「音のディテールが明確になった」との嬉しい回答，やはりそうだったか，と納得しました．

こうしてみると，市販のトランスは，利用率の点でも損だし，極小電流出力時にも動作が怪しげになる，と覚悟すべきでしょう．

お勧めは“抵抗インプット”かブリーダ

自称抵抗インプット方式は，もともと磁束密度の設定をまちがえたらしい欠陥トランスを救うために考えたものです．

その代わり，B電流のわずかな変化によって電源出力電圧は大きく変動します．半導体アンプのB級出力段のように20倍も電流が変動しては，最大電流の6倍のブリーダ電流を流したとしても，出力電圧は30%変化します．これではシャント・レギュレータを使うしかありません（**第6図**参照）．

“抵抗インプット“といえるのは，半波整流で $R_S/R_L=0.59$（R_S はトランスのサプライ・インピーダンスと挿入抵抗，ダイオードの動作抵抗を加算した値），$E_{DC}/E_m=0.318$（E_m は無負荷時のピーク電圧）くらいの場合です．

なお全波整流時には $R_S/R_L=0.22$，$E_{DC}/E_m=0.636$ にします．これはサプライ・インピーダンスを大きくして，直流平滑電圧を整流波形の直流平均値まで落とそうとしているためで，全波整流時にはチョーク・インプットと同等になります．ただし，RLで決まる一定電流だけでしか成り立ちません．

もっとも，B電流の変化が小さい低gm高μの古典管でも，かなり大きなブリーダが必要になります．この場合は正電源だけでよいので，**第7図**のようにブリッジ整流を使いますが，抵抗は各ダイオードごとに分けた方がよいのです．抵抗値は，まとめて1つにしてもダイオードごとに分けても，同一値になります．